沙区光伏设施干扰下近地表输沙通量分析①

唐国栋[1]， 蒙仲举[1]， 高 永[1]， 郑海峰[2]， 贾瑞庭[1]， 石 涛[1]
（1. 内蒙古农业大学沙漠治理学院/内蒙古自治区风沙物理与防沙治沙工程重点实验室，内蒙古 呼和浩特 010011；
2. 神华准格尔能源有限责任公司，内蒙古 鄂尔多斯 010300）

摘 要：为了揭示沙区建设光伏电站后沙尘运移特征和形态发育及演变过程，本文定量分析了主要风向（光伏板面向正南，风向为 W，即光伏设施排布方向与风向夹角为 0°）条件下，库布齐沙漠 200 MWp 光伏电站腹地区域光伏板不同位置输沙特征、地表风蚀状况和流场分布规律。结果显示：① 光伏板不同部位输沙率随风速的增大而增加，不同风速下平均输沙率板间（1.17 $g \cdot cm^{-2} \cdot min^{-1}$）> 板后（0.86 $g \cdot cm^{-2} \cdot min^{-1}$）> 板前（0.65 $g \cdot cm^{-2} \cdot min^{-1}$）。0～30 cm 垂直断面上，不同部位 90% 以上输沙率集中分布在 0～8 cm 高度范围内，95% 以上输沙率集中分布在 0～11 cm 高度范围内，挟沙气流中输沙率随高度的分布均符合指数规律递减（$R^2 \geq 0.98$）。② 沙粒平均跃移高度表现为板前 > 板后 > 板间，且与风速正相关。风沙流通量系数分析表明，板间和板后风沙流集中在近地层，而板前风沙流有向高层移动的趋势。③ 光伏板不同位置摩阻风速表现为板前（0.562 0～0.596 0 $m \cdot s^{-1}$）> 板后（0.331 2～0.436 0 $m \cdot s^{-1}$）> 板间（0.325 2～0.363 2 $m \cdot s^{-1}$）。而且板前干沙层厚度显著高于其他位置，土壤可蚀性增加，综合作用下导致板前发生强烈掏蚀现象，观测期风蚀深度可达 12.44 cm。研究可为沙漠地区光伏电站内风沙危害的科学防治提供理论支撑。

关键词：输沙率；风沙流结构；拟合模型；风速廓线；光伏电站；库布齐沙漠

风沙流是指含有沙粒的运动气流，挟沙气流中所搬运的沙子在搬运层内随高度的分布特征称为风沙流结构[1]。研究风沙流结构可以分析风沙地貌形态的形成发育、演变发展等规律，在认识客观规律基础上，采取有效的措施控制或促进风沙运动，才能达到除害兴利或转害为利的目的[2]。我国西北地区光照强，辐射充足，沙区土地使用成本低，为太阳能光伏产业发展提供了条件[3]。随着大规模太阳能光伏发电站的兴建，施工对地表扰动，土壤活化为风沙活动提供了丰富的沙源，而光伏设施干扰下流场格局发生变异，打破了原有维持地表平衡状态的动力分布，地表风沙运动规律随之改变[4]。有研究表明，光伏电站边缘区气流受到电板倾斜向下的导流作用，集流加速并形成回旋涡流，导致光伏板下出现掏蚀现象，形成以光伏板下沿为轴线的风蚀坑（沟），当气流经过集流加速在光伏板背风侧扩散后能量衰减，沙粒堆积在板间形成堆积沙垄地貌，严重威胁光伏电站安全运营[4]。目前，在光伏产业领域，学者们主要对光伏发电组件材料及安装方式[5-6]、光伏组件电学模型与仿真[7-8]、降尘对发电效率影响[9]、光伏面板积尘清洁[10]等研究较多，而关于沙区光伏设施干扰下地表侵蚀动力过程、风蚀地貌形成演变规律等方面研究相对薄弱。

笔者在库布齐沙漠 200 MWp 光伏电站试验观测中发现，光伏电站内风沙运动特征的观测结果显著受到光伏设施排布方向与风向夹角的影响。根据实地观测，光伏板面向正南、东西排布，在环境风向为偏 W 或偏 E 风条件下，密集排布的光伏板对风向会产生“整流作用”，电站腹地板间近地表则表现为 W 或 E 风向，此时电站内光伏板周围侵蚀和堆积过程强烈；当环境风向为偏 S 或偏 N 风时，光伏阵列有着类似沙障作用，截流阻沙效应显著，电站腹地侵蚀堆积过程表现微弱。基于此，研究光伏设施排布方向与风向不同夹角条件下的电站内近地表流场变异规律和输沙通量特征，有助于进一步认识沙漠地区架设光伏板后地表形态变化的发育过程和演变规

① **收稿日期：**2019-09-25； **修订日期：**2019-11-08
基金项目：内蒙古自治区科技重大专项（zdzx2018058-3）；国家重点研发计划（2016YFC0500906-3）；内蒙古自治区科技创新引导资金“沙区光伏电场生态产业技术研发与示范”项目；国家自然基金项目（41461001）资助
作者简介：唐国栋（1991-），男，博士研究生，研究方向为荒漠化防治. E-mail：18247158690@163.com
通讯作者：蒙仲举. E-mail：mengzhongju@126.com

律,进而可为更好地确定光伏基地风沙危害防治技术方案提供理论依据。

本研究主要定量分析了主要风向(光伏板面向正南,风向为 W,即光伏设施排布方向与风向夹角为 0°)条件下,库布齐沙漠 200 MWp 光伏电站腹地光伏板不同位置输沙通量,辅以风蚀测钎、HOBO 小型移动气象站和钢尺等工具观测光伏板不同位置的蚀积状况、风速变化和干沙层厚度等指标,旨在揭示光伏设施排布方向与风向夹角为 0°条件下电站腹地光伏板周围的风沙流活动规律,以期为全面认识沙区建设光伏电站后地表形态发育过程提供依据。

1 研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于内蒙古鄂尔多斯市杭锦旗独贵塔拉镇工业园区库布齐沙漠 200 MWp 光伏电站内,地理坐标为 37°20′~39°50′N,107°10′~111°45′E。该区域属于温带大陆性气候,年平均气温为 5~8 ℃,年降水量在 258.3 mm 左右,年潜在蒸发量 2 400 mm 左右,年太阳总辐射量 597.9 kJ · cm^{-2},无霜期 149 d,风沙活动主要集中在 3—5 月,全年大风日数为 25~35 d,全年盛行西北风和西风,夏季盛行东南风。平均风速≥5 m · s^{-1} 的次数为 323.4 次,最多年份达 418 次。该地区的沙丘主要呈 NW-ES 走向的新月形沙丘、新月形沙丘链和格状沙丘链等,沙丘高度 10~60 m,其中较为平缓的沙地占 10% 左右,半固定沙地占 30% ,60% 为流动性沙地,且流动性较强。

研究区光伏板设置方式及其规格:光伏板面向正南方,整体东西方向排布,相邻两排光伏板间距 900 cm,面板上沿距地面垂直高度 270 cm,下沿距地面垂直高度 35 cm。单组光伏板由 2 排 18 列 99 cm × 195 cm 基本光伏板单元组成,单组光伏板整体规格为 400 cm × 1 800 cm,地面投影宽度约为 320 cm。

1.2 试验设计与数据处理

1.2.1 试验布设 开展实验前光伏板不同位置已经发生严重的风蚀和堆积现象,光伏板下掏蚀形成以光伏电板前沿为轴线的风蚀沟,板间形成堆积沙垄地貌(图 1)。因此,在观测仪器布设前,首先将试验光伏板周围地表进行平整,整平后的光伏板下沿高度距离地表约 35 cm(图 2)。

观测仪器具体布设方法如图 3 所示。在光伏板板间、板前和板后 3 个位置同时放置集沙仪,集沙仪采集高度为 30 cm,共 15 个进沙口,进沙口规格为 2 cm × 2 cm。利用 HOBO 小型移动气象站同步观测光伏板板间、板前和板后 3 个位置 20 cm、50 cm、100 cm、200 cm 和 310 cm 高度处风速变化情况,风速数据记录间隔设定为 1 s,数据采集间隔设置为 3 s。同时利用风蚀测钎观测光伏板周围地表蚀积状况,沿垂直光伏板方向,在光伏板投影面积之外(即光伏板前、后)测钎间距离 100 cm,进入光伏板投影区测钎间距为 50 cm;这样的布设在沿平行光伏板走向布设 5 行风蚀测钎,每行测钎间距 200 cm;测钎长度 80 cm,地上外露 40 cm,地下埋设 40 cm。

试验于 2019 年 3 月 25—27 日进行,进行了风速(风向)、输沙率、风蚀量的同步观测。输沙观测依据风况分为3个时段进行,每次观测时间为1 h,



图 1 光伏板风蚀地表

Fig. 1 Wind erosion surface under the interference of PV panels



图 2 整平待试验光伏板地表

Fig. 2 Smoothing underlying surface to test

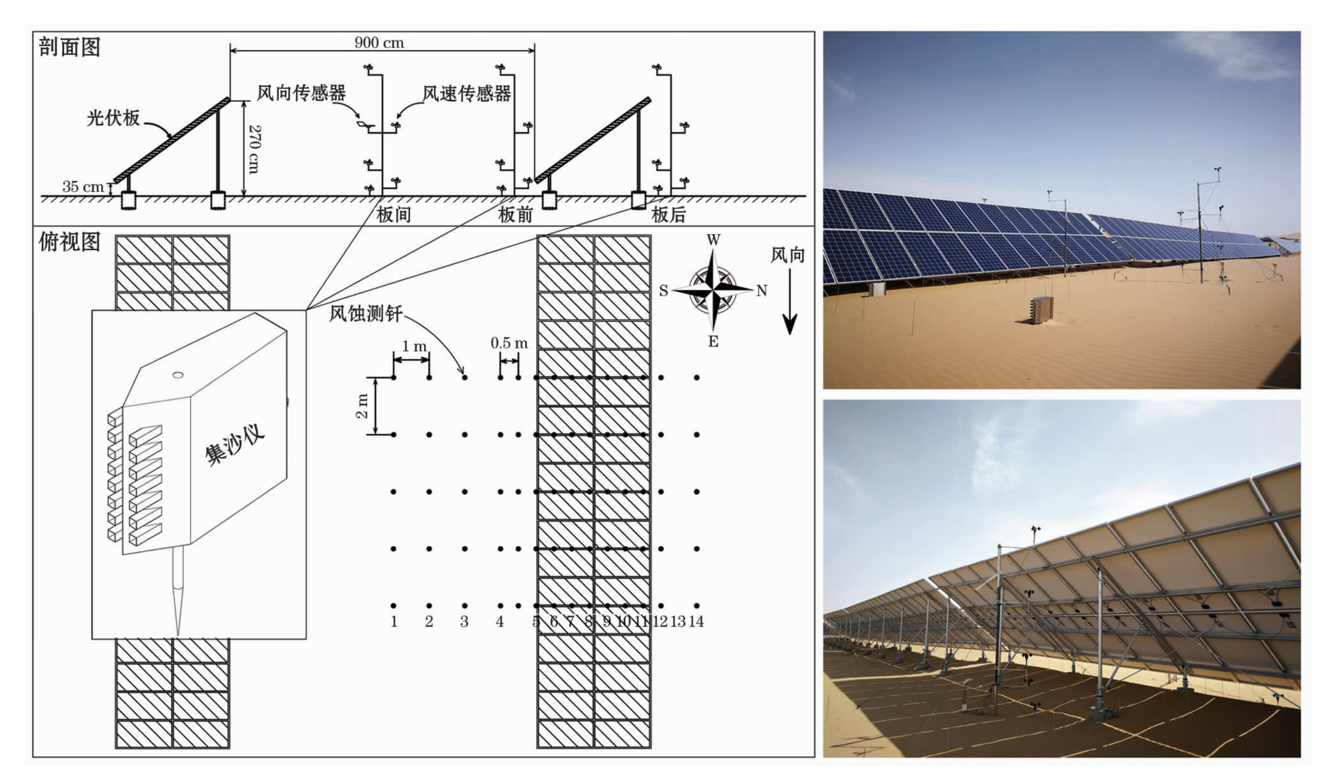


图 3　试验布设示意图

Fig. 3　Schematic diagram of the experimental layout

观测期 3 个阶段平均风速(2 m)为 7.79 m·s^{-1}、8.43 m·s^{-1}和 8.80 m·s^{-1},所收集到的沙物质用自封袋分层取样,带回实验室用 0.01 g 电子天平称重。风蚀测钎测定为一场风,时间段为 3 月 25 日 13:00 至 3 月 27 日 10:40。

1.2.2　数据处理

(1) 风沙流结构特征值

为阐释单组光伏板不同位置风沙流结构特征与沙物质吹蚀、搬运和堆积的关系,本研究引用文献[11]中提出的风沙流结构特征值 λ,作为判断地表蚀积方向的指标。本试验采用的集沙仪进沙口为 2 cm×2 cm,大量研究发现,根据拟合曲线求出 0～1 cm 高度和 2～10 cm 高度的输沙率,进而推导出 λ 值并判别地表蚀积方向与实际观测存在的偏差。本研究根据张正偲等[12]研究方法,利用 0～2 cm 和 2～10 cm 高度输沙率来计算其风沙流特征值。计算公式如下:

$$\lambda = \frac{Q_{2\sim10}}{Q_{0\sim2}} \tag{1}$$

式中:$Q_{2\sim10}$和 $Q_{0\sim2}$分别为风沙流中 2～10 cm 高度层和 0～2 cm 高度层的输沙率。

(2) 赤池信息量准则

风沙流通量最佳拟合模型采用赤池信息量准则(akaike information criterion,简称 AIC)确定,该准则是衡量统计模型拟合效果的一种标准,AIC 值越小,表明模型拟合效果越好。计算公式为:

$$\mathrm{AIC} = n\ln\left[\sum_{i=1}^{n}(q_i - \hat{q}_i)^2\right] + 2p \tag{2}$$

式中:n 为集沙仪集沙盒个数;q_i 为集沙仪实测结果;$\hat{q}_i$ 为模型拟合估算结果;p 为拟合模型中参数的个数[12]。

(3) 净风蚀量计算

根据风蚀测钎的风蚀与沉积计算净风蚀量 AI_n。

$$AI_n = \frac{\sum H_d + \sum H_e}{n_{pins}} \tag{3}$$

式中:H_d 和 H_e 分别表示观测点的沉积和风蚀,单位 cm;n_{pins}表示观测点的测钎根数[13-14]。

(4) 空气动力学粗糙度和摩阻速度计算

大气呈中性或近中性稳定条件下,地表风速廓线一般满足:

$$U_Z = \frac{U_*}{K}\ln\frac{Z}{Z_0} \tag{4}$$

式中:U_* 为摩阻速度;Z_0 为空气动力学粗糙度;K 为冯卡曼常数(0.4);Z 为距地面高度[15-16]。

本研究采用对数廓线拟合法计算空气动力学粗

糙度，测得 5 个高度（20 cm、50 cm、100 cm、200 cm 和 310 cm）处风速，用最小二乘回归所测得的风速廓线式：

$$U_Z = A + B\ln Z \quad (5)$$

式中：A、B 为回归系数。在公式（4）中，令 $U_Z = 0$ 可求出：

$$Z_0 = \exp(-A \cdot B^{-1}) \quad (6)$$

由公式（3）和（5）计算可得摩阻速度计算方程为[17]：

$$U_* = KB \quad (7)$$

2 结果与分析

2.1 光伏板不同位置输沙率特征

通过计算光伏板不同位置各层（0～30 cm，每 2 cm 一层，共 15 层）输沙率，然后累加得出总输沙率。结果显示，不同位置总输沙率随风速增大表现出增加趋势，不同风速下，总输沙率均表现为板间 > 板后 > 板前。7.79 m·s^{-1}风速下板间（0.953 g·cm^{-2}·min^{-1}）> 板后（0.570 g·cm^{-2}·min^{-1}）> 板前（0.496 g·cm^{-2}·min^{-1}）；8.43 m·s^{-1}风速下板间（1.074 g·cm^{-2}·min^{-1}）> 板后（0.655 g·cm^{-2}·min^{-1}）> 板前（0.602 g·cm^{-2}·min^{-1}）；8.80 m·s^{-1}风速下板间（1.470 g·cm^{-2}·min^{-1}）> 板后（1.348 g·cm^{-2}·min^{-1}）> 板前（0.847 g·cm^{-2}·min^{-1}）。不同风速下平均总输沙率为板间（1.17 g·cm^{-2}·min^{-1}）> 板后（0.86 g·cm^{-2}·min^{-1}）> 板前（0.65 g·cm^{-2}·min^{-1}），板前和板后输沙率分别为板间的 55.62% 和 73.58%。

为研究输沙率随高度的变化规律，利用 Origin 2017 做出散点图（图 4），结合前人的研究成果，用指数函数 $q = ae^{-bh}$ 和幂函数 $q = aH^h$ 分别进行了拟

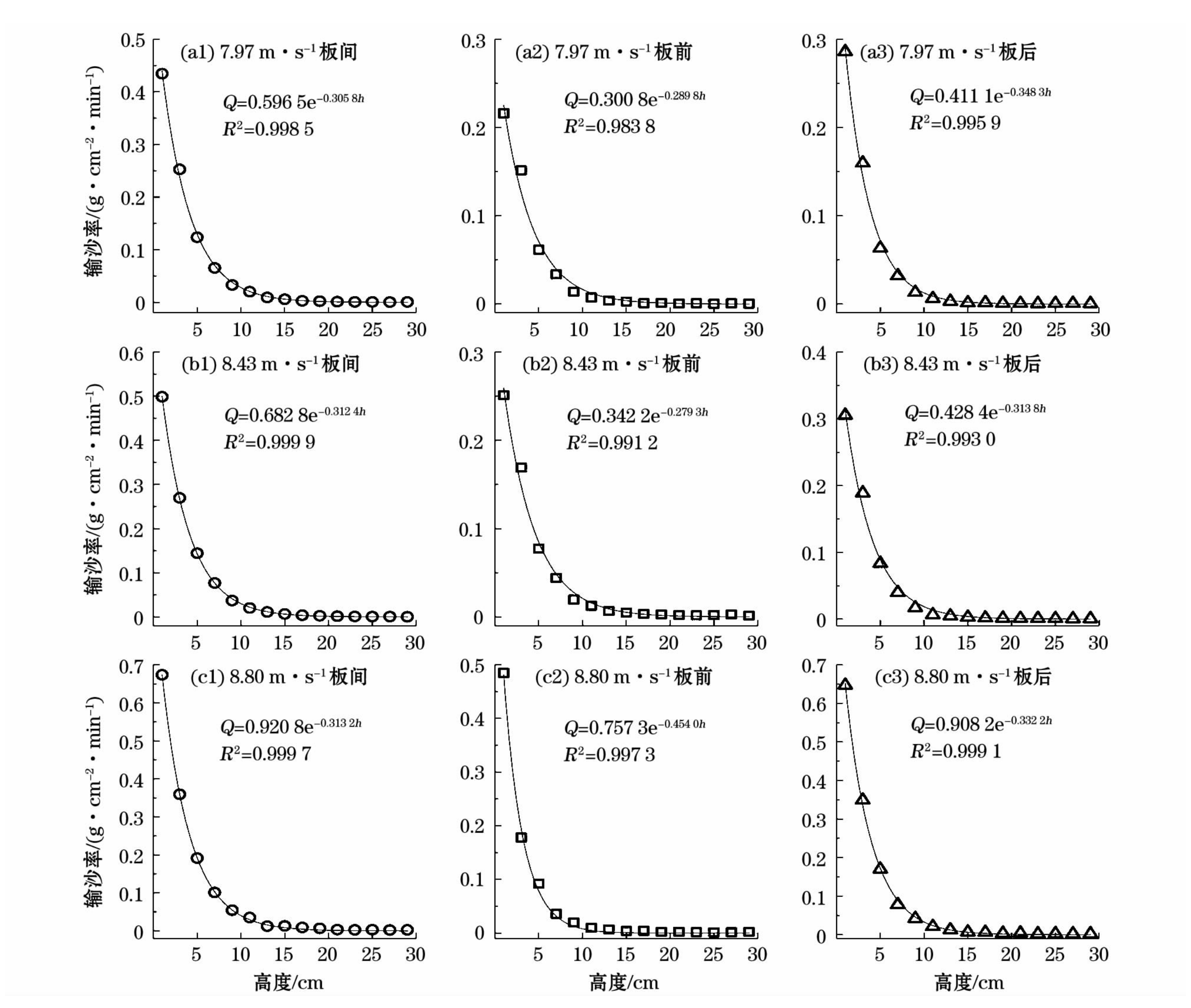


图 4 不同风速下光伏板不同部位输沙率指数函数拟合

Fig. 4 Mass-ux-density proles at the different positions and velocity of PV panels

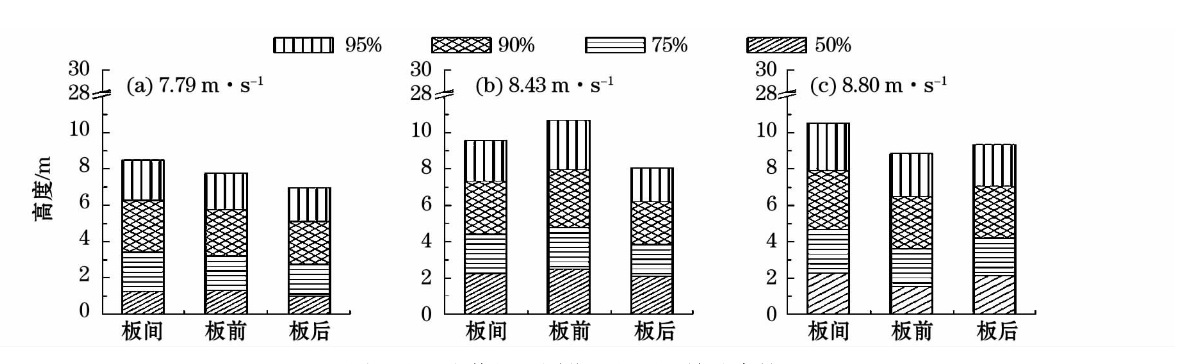


图 5　不同风速下光伏板不同位置的累积输沙率情况

Fig. 5　Cumulative percentage of sand transported rate at the different positions and velocity of PV panels

合,式中 q 为输沙率,a 和 b 为系数,h 为高度,结果发现不同风速梯度下均表现为指数函数相关度最高,$R^2 \geqslant 0.98$。说明光伏板不同位置输沙率随高度的变化更加符合指数函数形式,拟合函数系数用来表征不同条件下沙尘通量的变化特点。对于指数函数而言,有研究认为系数 a 表征风沙流中沙粒浓度的最大值,而有人则认为是蠕移输沙率;系数 b 一般认为是反映沙粒浓度随高度的衰减程度,即递减率,b 值越大衰减速度越慢,b 值越小衰减速度越快[18]。本研究系数 a 值的范围为 0.300 8 ~ 0.920 8,不同风速下 a 值均表现为光伏板板间 > 板后 > 板前,表明板间近地表风沙流的尘粒浓度或蠕移量大于板后和板前。系数 b 值范围为 0.279 3 ~ 0.454 0,在 7.97 $m \cdot s^{-1}$ 和 8.43 $m \cdot s^{-1}$ 风速下系数 b 的值板前 > 板间 > 板后,表明沙粒浓度随高度增加递减率依次增大。而 8.8 $m \cdot s^{-1}$ 风速下系数 b 的值板间 > 板后 > 板前,此时板前沙粒浓度随高度变化递减率发生突变。

2.2　光伏板不同位置沙粒的跃移高度

为更加直观地认识光伏板不同位置沙粒浓度与高度之间的关系,将累积输沙率随高度的变化做成柱状图。由图 5 可以看出,不同风速条件下沙尘输移高度存在差异,7.79 $m \cdot s^{-1}$ 风速下 75% 以上的输沙率集中分布在 0 ~ 4 cm 高度,除板间位置以外,90% 以上的输沙率分布在 0 ~ 6 cm 高度。随着风速的增加,不同位置的沙粒跃移高度随之升高,8.43 $m \cdot s^{-1}$ 和 8.80 $m \cdot s^{-1}$ 风速下 75% 以上的输沙率在 0 ~ 5 cm 高度范围内传输,90% 以上的输沙率分布在 0 ~ 8 cm 高度。比较不同位置沙粒跃移高度差异性,7.79 $m \cdot s^{-1}$ 风速下总体表现为板间 > 板前 > 板后,8.43 $m \cdot s^{-1}$ 风速下板前沙粒跃移高度显著上升,且高于板间和板后位置。而随着风速的继续增大,板前沙粒的跃移高度急剧下降,低于板间和板后位置。

平均跃移高度是表征地表受气流剪切状况的参数,其定义为在该高度以上及以下气流搬运沙物质能力相同,即累积输沙率随高度变化曲线上累积输沙率为 50% 所对应的高度。本研究中 7.97 $m \cdot s^{-1}$ 风速条件下沙粒平均跃移高度板前(2.31 cm) > 板后(2.25 cm) > 板间(1.98 cm);8.43 $m \cdot s^{-1}$ 风速条件下沙粒平均跃移高度板前(2.47 cm) > 板后(2.22 cm) > 板间(2.08 cm);而 8.80 $m \cdot s^{-1}$ 风速条件下沙粒平均跃移高度板间(2.26 cm) > 板后(2.10 cm) > 板前(1.52 cm)。可见,不同风速条件下沙粒平均跃移高度与通量系数反应的不同位置沙粒浓度随高度的变化趋势相一致,在 7.97 $m \cdot s^{-1}$ 和 8.43 $m \cdot s^{-1}$ 风速条件下,板间和板后位置沙粒平均跃移高度低,系数 a 值大 b 值小,风沙流运动相对更加贴近地表。而板前沙粒平均跃移高度高,系数 a 值小 b 值大,风沙流结构有向上层移动的趋势。

综上所述,在 8.80 $m \cdot s^{-1}$ 风速下,板前风沙流通量系数 b 值、沙粒整体和平均跃移高度均出现突变。初步分析其原因,是随着观测时段的进行,在 8.80 $m \cdot s^{-1}$ 风速条件下观测时,板前地表已经发生风蚀现象,风蚀深度可达 10 cm 以上,而地表风蚀导致土壤中的细粒物质易被吹蚀,相应表层粗沙组分比例增加,可蚀性降低[19]。从输沙率的变化中也可以印证这一事实,8.80 $m \cdot s^{-1}$ 风速下板前位置输沙率为不同部位平均输沙率的 69.33%,而 7.97 $m \cdot s^{-1}$ 和 8.43 $m \cdot s^{-1}$ 风速下分别为 73.70% 和 77.48%。同时地表粗粒化,使得沙粒平均跃移高度降低(表 1),8.80 $m \cdot s^{-1}$ 风速下板前近地表沙粒浓度占比显著增加,0 ~ 2 cm 层输沙率占比由 8.43 $m \cdot s^{-1}$ 时的 41.73% 上升到 8.80 $m \cdot s^{-1}$ 时的 57.24%,增加了 15.51%,而近地表沙粒浓度占比的增加导致沙粒浓度随高度增加递减率增大,进而

表 1 光伏板不同风速不同位置 0～2 cm 层输沙率占比情况对比

Tab. 1 Proportion of sand transport rate at the height of 0－2 cm at the different positions and velocity of PV panels

风速/(m·s⁻¹)	板间/%	板前/%	板后/%
7.97	45.57	43.55	50.12
8.43	46.41	41.73	46.62
8.80	45.82	57.24	47.97

出现系数 b 值急剧变大,沙粒整体和平均跃移高度均变低的现象。

2.3 光伏板不同位置蚀积规律

根据风沙流特征值计算公式,得出不同风速下光伏板不同位置风沙流结构特征值。7.97 $m\cdot s^{-1}$ 风速条件下,板间、板前和板后的 λ 值分别为 1.09、1.21 和 0.94;8.43 $m\cdot s^{-1}$ 风速条件下,板间、板前和板后的 λ 值分别为 1.05、1.23 和 1.08;在 8.80 $m\cdot s^{-1}$ 风速下,板间、板前和板后的 λ 值分别为 1.05、0.67 和 0.98。综合来看,光伏板板间的 λ 值大于 1,应处于弱风蚀状态。板后的 λ 值接近于 1,应处于平衡状态。板前除 8.80 $m\cdot s^{-1}$ 风速条件下 λ 值大于 1,近地表风沙流未达到饱和流,造成板前地表强烈风蚀。板前 8.80 $m\cdot s^{-1}$ 风速条件下 λ 为 0.67,而实际观测板前位置仍然处于风蚀搬运状态,出现此种情况的原因同样由于风蚀过程导致地表粗粒化[19],致使蠕移量加大(表 1),根据 λ 计算公式可知,分母增大,λ 值减小。

利用风蚀测钎计算光伏板不同位置净风蚀量发现(图 6),板前(即光伏板下沿)附近表现为强烈风蚀,风蚀深度达 12.44 cm。在板前向板间方向距离光伏板下沿 1.5 m 处周围表现为强烈堆积,堆积高度达 7.38 cm。而在板间和板后位置蚀积活动较弱,这与风沙流结构特征值 λ 分析结果基本一致。因此,光伏设施排列方向与风向夹角为 0°情况下板前会出现强烈掏蚀现象,而板间和板后的地表蚀积变化微弱,可见,板前位置是沙区光伏电站内防治的重要部位。

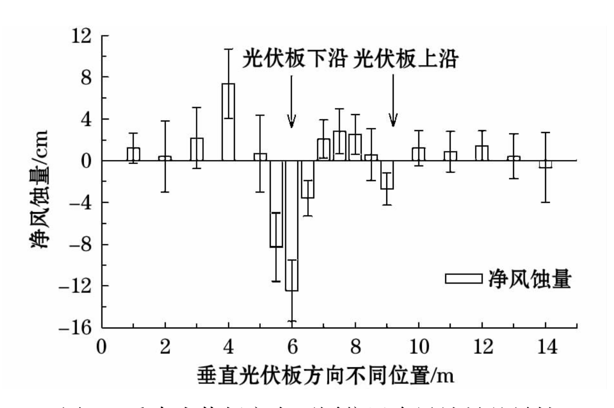


图 6 垂直光伏板方向不同位置净风蚀量差异性

Fig. 6 Volume of erosion and deposition around the test solar PV panels

3 讨 论

3.1 风沙流通量

不同下垫面近地表风沙流通量究竟符合怎样的函数分布至今仍然没有定论。刘芳等[20]对乌兰布和沙漠东北缘 5 种典型下垫面 0～100 cm 内输沙率随高度的变化进行函数拟合,发现幂函数的相关性最好。吴晓旭等[21]对毛乌素沙地风沙流结构研究发现,平坦流沙地、流动沙丘与固定沙丘丘顶上输沙率随高度都呈幂函数分布,半固定沙丘丘顶的输沙率随高度呈指数分布。张正偲等[12]对腾格里沙漠东南缘风沙流通量进行了长期观测,利用 5 种常用拟合模型对比研究发现,平坦沙地上风沙流通量更符合指数函数分布。陈曦等[22]对乌兰布和沙漠东南缘光伏电场电板的前沿、后沿及光伏阵行道处风沙流结构研究表明,电板不同部位输沙率随高度增加符合多项式函数形式。本研究基于野外观测数据,采用指数函数和幂函数进行拟合分析,运用赤池信息量准则研究发现,指数函数的相关度最高,且 AIC 值显著低于其他函数模型(表 2)。因此,指数函数能够很好模拟库布齐沙漠 200 MWp 光伏电站内风沙流通量。

观测方法的不同所得出系数 a、b 值的范围不同。对于指数函数而言,系数 b 值受拟合模型高度单位的影响,利用高度单位 cm 拟合时,相较于利用高度单位 m 进行拟合,系数 b 值扩大 100 倍。函数式选择的不同也是影响 b 值大小的因素,目前用的指数函数模型有 $q(h)=ab_1^h$、$q(h)=ae^{-b_2h}$、$q(h)=ae^{-h\cdot b_3^{-1}}$。计算可得 $b_1=e^{-b_2}=e^{-b_3^{-1}}$,可见,讨论系数 b 值范围时应在统一函数式的基础上。Dong 等[23]通过风洞试验研究表明,系数 a 的值小于 2.5,b 值最大可达 0.35〔高度单位为 cm,$q(h)=ae^{-h\cdot b^{-1}}$〕。哈斯[24]通过野外实验观测得出,4～10 m 高的横向沙丘系数 a 值小于 13,[0,1]区间值占总体的 70%,b 值范围为 0.193～0.494〔高度单位为 cm,$q(h)=ae^{-b_2h}$〕,换算后 b 值最大值为 5.18〔$q(h)=ae^{-h\cdot b^{-1}}$〕。张正偲等[12]在平坦沙地通过

表 2 输沙率随高度变化的指数函数和幂函数回归结果对比

Tab. 2 Results of the exponential and power regression analyses for the mass-ux-density profiles

风速/(m·s^{-1})	观测位置	指数函数拟合			幂函数拟合		
		公式	R^2	AIC	公式	R^2	AIC
7.97	板间	$Q=0.5965e^{-0.3058h}$	0.998 5	-117.11	$Q=0.2125h^{-0.0099}$	0.517 9	-5.88
	板前	$Q=0.3008e^{-0.2898h}$	0.983 8	-100.42	$Q=0.1109h^{-0.0052}$	0.516 5	-24.95
	板后	$Q=0.4111e^{-0.3483h}$	0.995 9	-114.47	$Q=0.1301h^{-0.0061}$	0.465 5	-20.68
8.43	板间	$Q=0.6828e^{-0.3124h}$	0.999 9	-153.36	$Q=0.5206h^{-0.9867}$	0.935 9	-56.68
	板前	$Q=0.3422e^{-0.2793h}$	0.991 2	-105.60	$Q=0.2681h^{-0.9188}$	0.893 8	-68.28
	板后	$Q=0.4284e^{-0.3138h}$	0.993 0	-103.719	$Q=0.3223h^{-0.9849}$	0.906 2	-64.72
8.80	板间	$Q=0.9208e^{-0.3132h}$	0.999 7	-129.49	$Q=0.7021h^{-0.9826}$	0.941 8	-49.35
	板前	$Q=0.7573e^{-0.4540h}$	0.997 3	-106.75	$Q=0.4924h^{-1.1841}$	0.980 5	-77.16
	板后	$Q=0.9082e^{-0.3322h}$	0.999 1	-113.44	$Q=0.6740h^{-1.0129}$	0.937 2	-49.28

长期野外实验观测发现,系数 a 值分布范围较大,最大值可达 547 左右,系数 b 值最大值为 0.06[高度单位为 m,$q(h)=ae^{-h\cdot b^{-1}}$],即 cm 高度单位下拟合最大值可达 6。本研究试验下垫面为无植被覆盖的流动沙地,光伏设施干扰下不同位置风沙流通量系数 a 值小于 0.92,系数 b 值在 2.2~3.6 之间[高度单位为 cm,$q(h)=ae^{-h\cdot b^{-1}}$],系数 a 值的范围与哈斯[24]、Dong 等[23]研究结果基本一致,系数 b 值的范围略小于哈斯[24]、张正偲等[12]的野外观测结果。

风沙运动是一种贴近地表的沙子搬运现象。本文基于野外观测发现,不同风速下光伏板不同位置 75% 以上的输沙率集中分布在 0~5 cm 高度,90% 以上的输沙率集中分布在 0~8 cm 高度,95% 以上的输沙率集中分布在 0~11 cm 高度。Chepil[25] 发现;土壤表面 0~5 cm 高度内输沙率占总体的 60%~80%,这与本研究结果相一致。吴正[26]野外观测表明,气流挟带沙量 90% 以上在地表 30 cm 高度内输送,其中约有 80% 输沙率在 0~10 cm 内传输。朱震达[27]通过实验研究认为,90% 的输沙率在 0~10 cm 高度内传输。张正偲等[12]通过 451 次风沙流观测数据研究得出,腾格里沙漠东南缘平坦沙地上 0~20 cm 高度范围内输沙率占总输沙率的比例大于 95%。陈新闯等[28]对乌兰布和沙漠流动沙丘野外观测得出,80% 以上输沙率集中于 0~10 cm 高度,90% 以上的输沙率集中于 0~20 cm 高度。这些研究结果均略微高于本研究,可见,光伏设施的存在,使得电站内风沙流垂直结构发生变化,与裸沙地相比有向下层移动的趋势。

3.2 光伏板不同位置蚀积机理

通过计算光伏板不同位置风沙流结构特征值发现,板间处于弱风蚀状态,板后处于弱堆积状态,板前处于强风蚀状态,而且风蚀测钎观测数据也很好的佐证了风沙流结构特征值所得出的结果。引起光伏板不同位置地表蚀积状态改变的主要原因是,由于光伏板的存在改变了近地表流场格局,已有研究表明边缘区光伏电板干扰下形成板下集流加速区,板前板后阻挡减速区,板面抬升加速区,板间消散恢复区,而腹地区域光伏电板强烈影响两侧流畅格局[4,29]。本研究对库布齐沙漠 200 MWp 光伏电站腹地区域风速流场进行了观测,结果显示不同风速条件下光伏板板间、板前、板后风速随高度增加变化规律趋于一致,呈"J"形变化(图 7),其中板前受光伏组件影响,风速随高度变化幅度较大,板间和板后 20~100 cm 高度范围内风速变化急剧,而 100~310 cm 高度范围内风速变化平缓。可见,光伏板的存在主要影响近地表 100 cm 高度范围内的风速流场,100 cm 高度范围内风速大小均表现为板间 > 板后 > 板前,这与不同位置总输沙率大小关系相一致。计算光伏板不同位置空气动力学粗糙度发现,板前(0.848 2~1.100 0 cm) > 板后(0.036 1~0.086 9 cm) > 板间(0.008 8~0.018 2 cm),这与近地表 100 cm 高度范围内不同位置风速大小呈反比关系,与不同位置总输沙率呈反比关系,说明光伏板主要影响了板前周围气流场,增加地表粗糙度的同时减小了输沙率。

计算光伏板不同位置摩阻风速表现为板前(0.562 0~0.596 0 m·s^{-1}) > 板后(0.331 2~0.436 0 m·s^{-1}) > 板间(0.325 2~0.363 2 m·s^{-1})。表明板前地表所受气流剪切力最大,这与平均跃移高度所表征的结果相一致。同时,本研究观

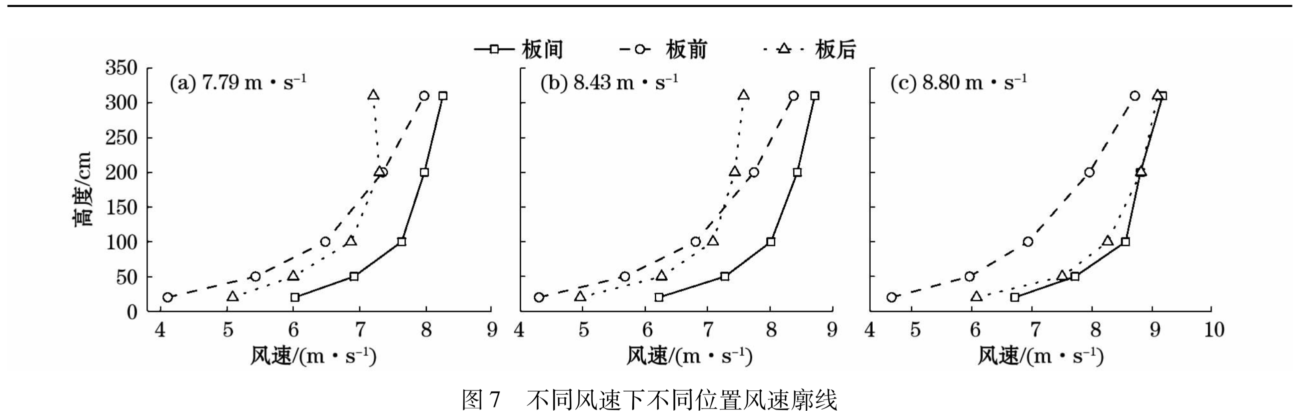


图 7　不同风速下不同位置风速廓线

Fig. 7　Wind velocity proles at the different positions and velocity of PV panels

测了试验期间光伏板不同位置的干沙层厚度，发现板间位置平均为 10.17 cm，标准差 0.65。板前位置平均为 25.57 cm，标准差 1.00。板后位置平均为 13.73 cm，标准差 2.07。干沙层厚度在不同位置差异性较大，板前和板间干沙层厚度差异达到 15 cm 以上。干砂层厚度的不同表明光伏板不同位置土壤表层含水量存在较大差异，土壤含水量达到一定阈值后，沙粒间的黏结力增大，起动风速也随之增大，导致输沙率减小[30]。综上所述，光伏板干扰下板前地表受气流剪切力增大和表层土壤可蚀性增加可能是引起地表强烈掏蚀的主要原因。

4　结 论

（1）库布齐沙漠 200 MWp 光伏电站腹地区域光伏板不同位置输沙率大小关系为板间 > 板后 > 板前，0 ~ 30 cm 高度范围内挟沙气流中输沙率随高度的分布均符合指数规律递减（$R^2 \geqslant 0.98$）。通过对光伏电站腹地区域光伏板不同位置沙粒跃移高度和通量系数 a、b 综合分析得出，板间风沙流运动相对更加贴近地表，而板前有向上层移动的趋势。

（2）结合不同位置风况观测结果，板前位置受到光伏设施的阻滞作用最为强烈，近地表 100 cm 高度范围风速明显低于板后和板间位置，但是摩阻速度增大，且沙粒的整体和平均跃移高度显著高于板间和板后，表明板前位置气流对地表剪切力较大，同时光伏板干扰下板前位置干沙层厚度增加，土壤表层含水量下降，可蚀性上升，从而导致了板前位置处于强风蚀状态。风沙流结构特征值和风蚀测钎的实际观测数据结果也很好地佐证了这一结果。

（3）本研究初步证实光伏电站腹地区域和边缘区域侵蚀机理异同，但关于光伏板干扰下的侵蚀动力学机制任然不能完全解释，有必要继续开展光伏设施干扰下流场格局变异及其与地表侵蚀堆积过程动力关联的系统研究，明晰地表形态演化的过程，可为沙漠地区光伏电站内风沙危害的科学防治提供理论支撑。

参考文献（References）：

[1] 董玉祥，Hesp P A，Namikas S L，等. 海岸横向沙脊表面风沙流结构的野外观测研究[J]. 地理科学，2008，28(4)：507－512. [Dong Yuxiang，Hesp P A，Namikas S L，et al. Field measurements of structure of wind-sand flow on coastal transverse ridge in China [J]. Scientia Geographica Sinica，2008，28(4)：507－512.]

[2] 马玉明. 风沙运动学[M]. 呼和浩特：远方出版社，2004：124－134. [Ma Yuming. Blown Sand Kinematics[M]. Hohhot：Distant Press，2004：124－134.]

[3] 陈曦，高永，娜仁格日勒，等. 风场及光伏电场配置对阵列风沙结构影响的模拟分析[J]. 北京林业大学学报，2017，39(8)：68－76. [Chen Xi，Gao Yong，Narenggerile，et al. Simulation analysis of effects of wind field and photovoltaic DC field allocation on aeolian-sand structure [J]. Journal of Beijing Forestry University，2017，39(8)：68－76.]

[4] 郭彩赟，韩致文，李爱敏，等. 库布齐沙漠 110 MW 光伏基地次生风沙危害的动力学机制[J]. 中国沙漠，2018，38(2)：225－232. [Guo Caiyun，Han Zhiwen，Li Aimin，et al. Dynamic mechanism research on the secondary blown sand disaster in the 110 MW photovoltaic arrays of the Hobq Desert[J]. Journal of Desert Research，2018，38(2)：225－232.]

[5] 戴恩琦，王欢欢，谢汝平，等. 晶体硅表面纳米孔减反光结构的制备及其性能表征[J]. 光电子 · 激光，2017，28(12)：1325－1330. [Dai Enqi，Wang Huanhuan，Xie Ruping，et al. Fabrication and performance of silicon nanohole antireflection structure for crystalline silicon solar cells[J]. Journal of Optoelectronics Laser，2017，28(12)：1325－1330.]

[6] 迟福建，葛磊蛟，洪博文，等. 固定式光伏发电组件最佳倾角的聚类分析方法[J]. 电测与仪表，2018，55(13)：89－93，123.

[Chi Fujian,Ge Leijiao,Hong Bowen,et al. An optimal tilt angle method of the fixed PV module based on clustering analysis[J]. Electrical Measurement & Instrumentation,2018,55(13):89-93,123.]

[7] Chin V J,Salam Z,Ishaque K. Cell modelling and model parameters estimation techniques for photovoltaic simulator application:A review[J]. Applied Energy,2015,154:500-519.

[8] Villalva M G,Gazoli J R,Filho E R. Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays[J]. IEEE Trans Power Electron,2009,24:1198-1208.

[9] 孙家欢,王涛,薛娴,等. 降尘对中国北方主要城市光伏电站发电量的影响[J]. 中国沙漠,2016,36(4):932-942. [Sun Jiahuan,Wand Tao,Xue Xian,et al. The effect of dustfall on the power output of photovoltaic plants located in major cities in Northearn China[J]. Journal of Desert Research,2016,36(4):932-942.]

[10] 鲍官军,张林威,蔡世波,等. 光伏面板积灰及除尘清洁技术研究综述[J]. 机电工程,2013,30(8):909-913. [Bao Guanjun,Zhang Linwei,Cai Shibo,et al. Review on dust depositing on PV module and cleaning techniques[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering,2013,30(8):909-913.]

[11] 丁国栋. 风沙物理学[M]. 北京:中国林业出版社,2010:85-86. [Ding Guodong. Aeolian Physics[M]. Beijing:China Forestry Press,2010:85-86.]

[12] 张正偲,董治宝. 腾格里沙漠东南部野外风沙流观测[J]. 中国沙漠,2013,33(4):973-980. [Zhang Zhengcai,Dong Zhibao. Field observation of aeolian sediment flux in the Southeast Tengger Desert[J]. Journal of Desert Research,2013,33(4):973-980.]

[13] 李锦荣,郭建英,赵纳祺,等. 乌兰布和沙漠流动沙丘风蚀空间分布规律及其影响因素[J]. 中国沙漠,2018,38(5):928-935. [Li Jinrong,Guo Jianying,Zhao Naqi,et al. The spatial and temporal variability of sand erosion and its influences factors across a coastal dune in Ulan Buh Desert[J]. Journal of Desert Research,2018,38(5):928-935.]

[14] 蔡东旭,李生宇,雷加强,等. 新月形沙丘对湖积平原风蚀荒漠化的影响[J]. 干旱区研究,2018,35(6):1496-1504. [Cai Dongxu,Li Shengyu,Lei Jiaqiang,et al. Effect of barchan dune on surface wind erosion over lacustrine plain[J]. Arid Zone Research,2018,35(6):1496-1504.]

[15] Wiggs G F S,Livingstone I,Thomas D S G,et al. Airflow and roughness characteristics over partially vegetated linear dunes in the southwest Kalahari Desert[J]. Earth Surface Processes and Landforms,1996,21(1):19-34.

[16] 毛东雷,蔡富艳,杨雪峰,等. 新疆策勒绿洲-沙漠过渡带不同下垫面风场特征[J]. 干旱区研究,2019,36(5):1117-1126. [Mao Donglei,Cai Fuyan,Yang Xuefeng,et al. Characteristics of wind filed over different underlying surfaces in the Oasis-Desert ecotone in Qira,Xinjiang[J]. Arid Zone Research,2019,36(5):1117-1126.]

[17] 刘小平,董治宝. 空气动力学粗糙度的物理与实践意义[J]. 中国沙漠,2003,23(4):3-12. [Liu Xiaoping,Dong Zhibao. Review of aerodynamic roughness length[J]. Journal of Desert Research,2003,23(4):3-12.]

[18] 王洪涛,董治宝,张晓航. 风沙流中沙粒浓度分布的实验研究[J]. 地球科学进展,2004,19(5):732-735. [Wang Hongtao,Dong Zhibao,Zhang Xiaohang. A study of the particle concentration in the sand flux:A wind tunnel investigation[J]. Advances in Earth Science,2004,19(5):732-735.]

[19] 高君亮,高永,罗凤敏,等. 表土粒度特征对风蚀荒漠化的响应[J]. 科技导报,2014,32(25):20-25. [Gao Junliang,Gao Yong,Luo Fengmin,et al. Response of surface soil grain size characteristics to wind erosion desertification[J]. Science & Technology Review,2014,32(25):20-25.]

[20] 刘芳,郝玉光,辛智鸣,等. 乌兰布和沙漠东北缘地表风沙流结构特征[J]. 中国沙漠,2014,34(5):1200-1207. [Liu Fang,Hao Yuguang,Xin Zhiming,et al. The surface aeolian-sand flow structure in the northeastern margin of the Ulanbuh Desert[J]. Journal of Desert Research,2014,34(5):1200-1207.]

[21] 吴晓旭,邹学勇,王仁德,等. 毛乌素沙地不同下垫面的风沙运动特征[J]. 中国沙漠,2011,31(4):828-835. [Wu Xiaoxu,Zou Xueyong,Wang Rende,et al. Aeolian movement characteristics over different underlying surfaces in Mu Us Sandy Land[J]. Journal of Desert Research,2011,31(4):828-835.]

[22] 陈曦,高永,翟波,等. 沙区光伏电场的风沙流输移特征[J]. 干旱区研究,2019,36(3):684-690. [Chen Xi,Gao Yong,Zhai Bo,et al. Transport of wind-drift sand in photovoltaic electric field in sand area[J]. Arid Zone Research,2019,36(3):684-690.]

[23] Dong Z B,Liu X P,Wang H T,et al. The flux profile of a blowing sand cloud:A wind tunnel investigation[J]. Geomorphology,2003,49(3):219-230.

[24] 哈斯. 腾格里沙漠东南缘沙丘表面风沙流结构变异的初步研究[J]. 科学通报,2004,49(11):1099-1104. [Ha Si. Study on aeolian sediment flux structure of dune surface in the Southeast Tengger Desert[J]. Chinese Science Bulletin,2004,49(11):1099-1104.]

[25] Chepil W S. Dynamics of wind erosion:Nature of movement of soil by wind[J]. Soil Science,1945,60(4):305-320.

[26] 吴正. 风沙地貌与治沙工程学[M]. 北京:科学出版社,2003:60-70. [Wu Zheng. Geomorphology of Wind-Drift Sands and Their Controlled Engineering[M]. Beijing:Science Press,2003:60-70.]

[27] 朱震达. 应用实验方法研究风沙地貌形成过程的若干特征[J]. 治沙研究,1962(4):48-61. [Zhu Zhenda. Some characteristics of aeolian sand geomorphology formation studied by experimental method[J]. Desert Control Research,1962(4):48-61.]

[28] 陈新闯,董智,李锦荣,等. 乌兰布和沙漠不同下垫面冬季沙尘

通量[J]. 中国沙漠,2016,36(6):1527 – 1532. [Chen Xinchuang,Dong Zhi,Li Jinrong,et al. Winter sand-dust flux over different underlying surfaces in the Ulan Buh Desert[J]. Journal of Desert Research,2016,36(6):1527 – 1532.]

[29] 杨世荣,凌侠,蒙仲举,等. 库布齐沙漠生态光伏电站风速脉动特征[J]. 干旱区研究,2019,36(5):1309 – 1317. [Yang Shirong,Ling Xia,Meng Zhongju,et al. Wind speed fluctuation at kubuqi desert ecological photovoltaic power station[J]. Arid Zone Research,2019,36(5):1309 – 1317.]

[30] 董治宝,钱广强. 关于土壤水分对风蚀起动风速影响研究的现状与问题[J]. 土壤学报,2007,44(5):934 – 942. [Dong Zhibao,Qian Guangqiang. A review on effect of soil moisture on wind erosion threshold velocity[J]. Acta Pedologica Sinica,2007,44(5):934 – 942.]

Near-surface sand-dust flux under the interference of photovoltaic facilities in sandy areas

TANG Guo-dong[1], MENG Zhong-ju[1], GAO Yong[1], ZHENG Hai-feng[2], JIA Rui-ting[1], SHI Tao[1]

(1. *Desert Science and Engineering college/Key Laboratory of Aeolian Sand Physics and Sand Control Engineering in Inner Mongolia*, *Inner Mongolia Agricultural University*, *Hohhot* 010011, *Inner Mongolia*, *China*;
2. *Shenhua Group Zhungeer Energy Co.*, *Ltd*, *Ordos* 010300, *Inner Mongolia*, *China*)

Abstract: This study assesses the characteristics of sand transport, morphological development and their evolution after the construction of a photovoltaic (PV) power station in a sandy area. Field wind flow, sediment transport and surface elevation changes were analyzed in the hinterland of a 200 MWp PV power station in the Hobq Desert, where the angle between the arrangement of the PV facilities and wind direction is 0° (i. e., the PV panels face S and the wind direction is W). The results show that: (1) The total sand transport rate sequences around the PV panels were highest in the zones between panels ($1.17\ g \cdot cm^{-2} \cdot min^{-1}$), followed by the zones behind panels ($0.86\ g \cdot cm^{-2} \cdot min^{-1}$), and finally the zones in front of panels ($0.65\ g \cdot cm^{-2} \cdot min^{-1}$). Sand transport rate was also found to decrease with increasing height. On the vertical section of 0 – 30 cm, more than 90% of the total sand transport flux was distributed within the height 0 – 8 cm, and over 95% of the total sand transport flux was distributed within the height 0 – 11 cm. The sediment discharge over three typical photovoltaic panel positions decreased with height and conformed to an exponential function distribution ($R^2 \geq 0.98$). (2) The average saltation height was positively correlated with wind speed; saltation height was, in order from highest to lowest, in front of panels > behind panels > between panels. The sand flux coefficient of wind-sand flow was also analyzed, and it was found that sand flux tends to be highest in front of panels, whereas between and behind panels, the flux was mostly concentrated in the near ground layer. (3) Under the interference of PV panels, shear velocities were 0.562 0 – 0.596 0, 0.331 2 – 0.436 0 $m \cdot s^{-1}$, and 0.325 2 – 0.363 2 $m \cdot s^{-1}$ for the zones in front of, behind, and between panels, respectively. The thickness of the dry sand layer of the zones in front of panels was also significantly higher than at other locations, increasing soil erodibility. A strong erosion occurred in the zones in front of panels by comprehensive action, and wind erosion depth reached 12.44 cm during the observation period. This study provides a better technical scheme for wind-sand hazards for the case of solar PV power stations in order to ensure their stable and safe operation.

Key words: sand transport; aeolian sediment flux structure; fitted model; wind profile; photovoltaic power station; the Hobq Desert